

燃气轮机涡轮壳体铸造

杨程坤^{1, 2}, 吴仁贵², 叶文辉²

(1. 辽宁福鞍重工股份有限公司, 辽宁鞍山 114016; 2. 中国铸造协会, 北京 100084)

摘要: 涡轮壳体结构复杂, 壁厚相差大, 尺寸精度控制困难, 并且易产生表面缺陷、缩松、裂纹等问题。通过对涡轮壳体的结构、质量要求和使用状况进行分析, 从铸造工艺、浇注工艺、型砂工艺、热处理工艺等多方面提出了相应的解决方案。采用组芯结构、1.5%~1.9%的收缩率和防变形拉筋保证了气道的尺寸精度; 采用底注式浇注系统、合理的液面上升速度等措施防止夹杂和缩松缺陷, 保证了铸件内部质量; 采用铬铁矿砂作为面砂、气道内使用铬铁矿砂的工艺保证了铸件表面质量和气道壁的补缩效果; 采用专用料盘固定, 控制加热和冷却速度, 防止了铸件热处理变形。

关键词: 涡轮壳体; 铸钢; 铸造工艺; 变形

1 铸件简介

涡轮壳体是燃气轮机燃烧室部位的关键零部件, 三维模型如图1所示。涡轮壳体起到形成涡轮工作的腔体并对进出气导向、支撑涡轮轴、燃烧室及涡轮旋转组件、提高燃气压力的作用, 也是整体固定的基体。该涡轮壳体的最大外形尺寸: 1 780 mm × 1 662 mm × 700 mm, 重量1.3 t。由于生产难度大, 每件的进口价格超过100万元人民币, 国内寻找不到可以生产的厂家, 我公司决定自主生产。涡轮壳体材质为铁素体耐热钢, 牌号为15Cr1Mo1V, 化学成分见表1。

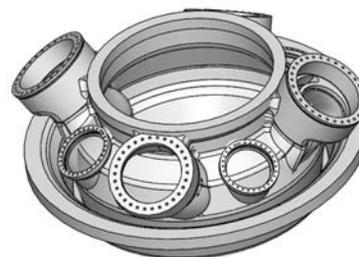


图1 涡轮壳体三维模型

Fig. 1 3D model of the turbine shell

表1 涡轮壳体的化学成分

Table 1 Chemical Composition of the turbine shell

w_B /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
0.11~0.20	0.20~0.60	0.50~0.90	≤0.020	≤0.015	1.20~1.50	0.90~1.20	0.15~0.25	≤0.50

2 工艺难点

2.1 产品关联尺寸多, 公差要求严格, 尺寸精度控制难

涡轮壳体具有多层薄壁和狭窄腔室的回转体结构, 剖面视图如图2所示, 箭头指出的地方为狭窄气道, 气道间距65 mm, 大部分壁厚仅有20 mm。气道仅靠底部连接, 上部为开口状态, 非常容易变形。气道内表面要求无粘砂、冷隔、多肉、缺肉以及氧化皮等缺陷, 表面粗糙度 Ra 小于12.5 μm 。铸造尺寸公差要求达到 Γ O C T P 53464—2009中的CT8级, 内部质量按照JB/T 9630.2—1999进行整体UT检测, 2级验收; 表面质量按照JB/T 9630.1—1999进行整体MT检测, 1级验收。

作者简介:

杨程坤(1984-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为大型铸钢件铸造工艺研发和产品质量控制。电话: 13841257329, E-mail: yck919@163.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

03-0424-04

收稿日期:

2023-04-25 收到初稿,

2023-11-16 收到修订稿。

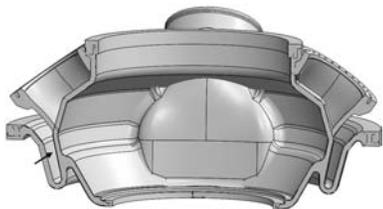


图2 涡轮壳体剖面视图

Fig. 2 Section view of turbine shell

2.2 形状复杂，易产生表面缺陷且去除困难

涡轮壳体的结构复杂，需要多腔室组芯造型，在浇注过程中钢液容易形成紊流，气道表面易出现卷渣、皱褶、气孔或者裂纹等缺陷。由于气道空间狭窄，内表面打磨和缺陷去除、补焊都非常困难，如果缺陷严重可能导致产品报废。所以在工艺设计时要充分考虑各种因素，尽量减少此类缺陷的产生，减轻后续清理工作量，降低报废风险。

2.3 易产生内部缩松及裂纹缺陷

涡轮壳体材质为15Cr1Mo1V，由于化学成分中含有裂纹敏感性元素V，在铸造生产过程中容易产生裂纹；另外，涡轮壳体的结构复杂，薄厚壁相交的部位较多，在壁厚截面变化较大的地方容易产生内部缩松及收缩裂纹等缺陷。

2.4 薄壁易产生变形，无法矫形

三层薄壁和顶部的法兰壁厚变化比较大，收缩不一致；整圈气道仅靠底部20 mm的壁厚连接，在浇注后的凝固冷却、打箱、切割冒口和补贴、热处理环节容易产生变形，因此需要在工艺设计时考虑防变形方案。

3 铸造工艺设计

3.1 铸件设计

气道壁厚20 mm，形位公差 ± 2 mm，综合考虑涂料厚度、热处理氧化层厚度，壁厚设计为23 mm，即气道壁厚两侧均匀增加1.5 mm。加工面的加工余量设计为15 mm。铸件整体采用实样组芯造型工艺，圆周方向的凝固收缩率按照1.5%~1.9%设计。

3.2 防变形设计

在气道壁之间设置等壁厚的拉筋，高度300 mm，间距250 mm，周向均布，拉筋与气道壁之间的R角为R25 mm。这些拉筋一直保留到最后一次热处理结束，然后采用打磨的方式去除。这样的话，能够在所有热加工工序起到防止气道变形的作用。

另外，在热处理过程中，除了气道容易变形外，

涡轮壳体其他部位也容易发生变形，而料盘的使用会在热处理过程中起到很好的防变形作用。因此，在铸造工艺设计阶段，设计一个热处理专用料盘，料盘采用栅格结构，栅格壁厚200 mm，镂空尺寸为200 mm × 200 mm内圆角R50 mm，和涡轮壳体同炉浇注。

3.3 冒口设计

由于该铸件的热节比较分散，铸造工艺设计采用明冒口和暗冒口组合的方式，分别补缩法兰、燃烧罐孔、壳体内外壁，冒口设计方案如图3所示。为了保证冒口的补缩效率，浇注到钢液距离冒口上表面50~100 mm使用发热覆盖剂。

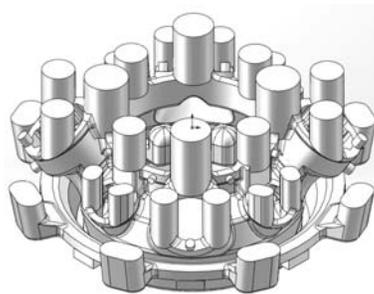


图3 涡轮壳体铸造工艺设计

Fig. 3 Casting process design of turbine shell

铸造工艺设计完成后，使用MAGMA数值模拟软件对温度场、充型过程进行了数值模拟，分析了液相比和缩孔缩松，结果如图4所示。根据数值模拟结果，最终优化后的铸造工艺设计能够满足铸件的质量要求。

3.4 浇注工艺参数选择

采用底返式浇注系统，根据浇注重量、上升速度，选择 $\Phi 60$ mm滑动水口，各浇注系统截面积比例为 $\sum A_{包} : \sum A_{直} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : 1.5 : 4.6 : 4.1$ 。

该材质的液相线温度为1 450 °C，固相线温度为1 350 °C，浇注温度一般选择1 550~1 560 °C，考虑到薄壁和结构的复杂性，提高浇注温度到1 580 °C ± 5 °C，目标浇注温度为1 580 °C。

为了防止钢液二次氧化，浇注前型腔通氩气。浇注时使用氩气保护圈在钢包下水口周围做好钢液的防护。为了防止浇注喷溅，控制钢液进入型腔的初始速度低于0.5 m/s，钢液上升速度控制在12~14 mm/s^[1]；由于浇注时钢液的惯性，在浇注结束时造成液面下降，从而带来补缩不足或者卷渣等缺陷，为了避免这个问题，当钢液上升到距离冒口顶部200 mm（提前刻线）时，采用半流浇注的方式，直至钢液平稳充满整个冒口。

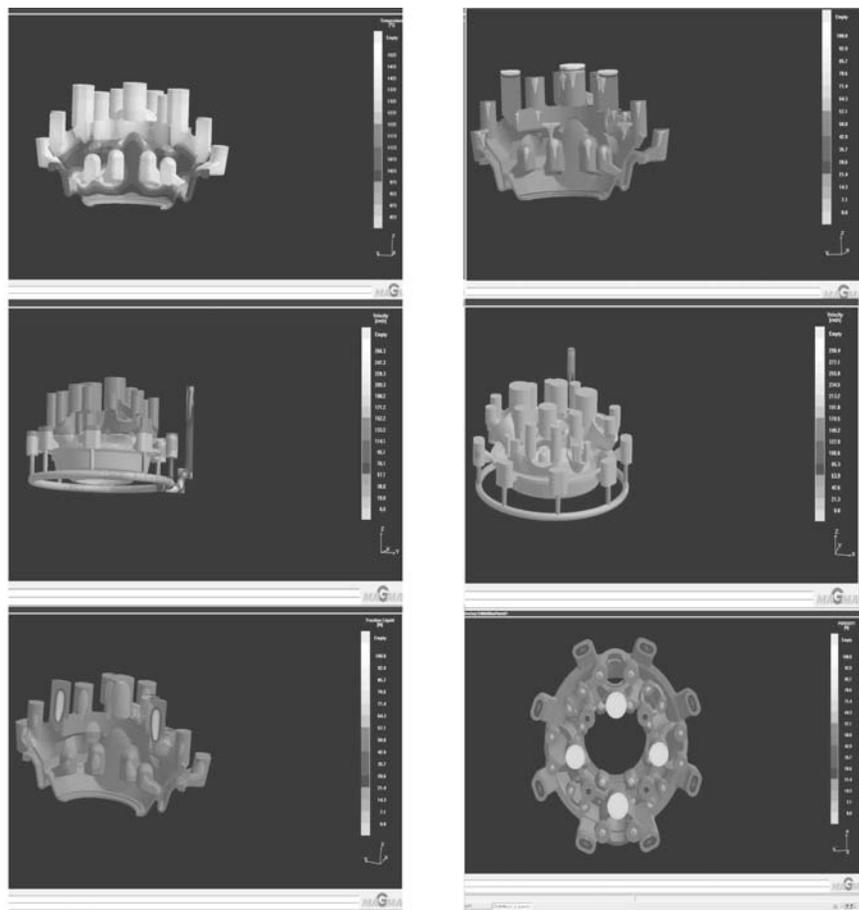


图4 铸造工艺数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of the casting process

3.5 组芯造型

为了保证铸件表面质量，避免缺陷的产生和清理，全部用新砂造型。型砂选用原则：在铸件壁厚 < 50 mm的部位，用 SiO_2 含量超过99.26%的福耀文昌硅砂。在壁厚 ≥ 50 mm的部位，采用面背砂工艺，面砂用50 mm厚的新铬铁矿砂，背砂用硅砂；由于气道壁厚为20 mm，间距65 mm，吃砂量较小，气道芯砂使用新铬铁矿砂，起到激冷的作用，保证补缩效果和表面质量。

由于所使用的碱性酚醛树脂砂发气量比较大，浇注时容易造成铸件表面侵入性气孔，因此在砂芯内埋 $\Phi 12$ mm的硬质排气绳，排气绳距离砂芯表面 ≤ 50 mm；气道芯内的排气绳居中放置，实现浇注时产生的气体引到上箱外排。

起模后，检查型芯表面质量，清理掉砂型飞边，进行喷涂，使用醇基刚玉粉涂料，喷涂3次，涂层厚度0.6~0.8 mm。内腔环形芯采用组芯的方式造型，下芯前，凿开准备焊接固定的两个相邻芯子的芯骨部位（图5中箭头部位），露出芯骨，然后下芯，用下芯样板确定好芯子的位置后，将芯骨焊接成型固定。待焊接部位冷却到室温后用角磨工具清理掉焊渣，填入混



图5 组芯结构和砂芯固定方法

Fig. 5 Cores assembly and fixing method

好粘结剂的新砂修补成型，待24 h硬化后刷涂料、烘干。

3.6 打箱工艺参数

该材质的铸态组织为铁素体+珠光体组织，相变应力不大，可以等铸件冷却到 100 $^{\circ}\text{C}$ 时打箱。如果采用热打箱的方式，由于壁厚太薄，在打箱时容易产生变形。另外铸件尺寸和重量比较小，冷却到 100 $^{\circ}\text{C}$ 大约需要15天的时间，对交付工期没有影响，因此工艺规定在冒口根部测温，当温度低于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时打箱。打箱后，铸件水平放置在静止空气中冷却到室温，然后进行喷

丸处理。

3.7 热处理工艺

该材质含有一定量的合金元素，浇注后凝固时间长，铸态组织中存在成分偏析。另外，组织中的碳化物尺寸较大，对铸件的服役性能影响较大，因此，综合考虑成分均匀化和性能改善，涡轮壳体需要采用完全退火+正火+回火的热处理方式，热处理工艺如图6所示。热处理结束后最终获得粒状贝氏体+≤5%的先共析铁素体组织。为了实现这一结果，正火时奥氏体化结束后的冷却非常重要，通常采用雾冷的方式，实现在出炉后1 h内铸件冷却到550℃以下然后继续空冷进行共析转变。一方面增加了奥氏体的冷却速度，控制先

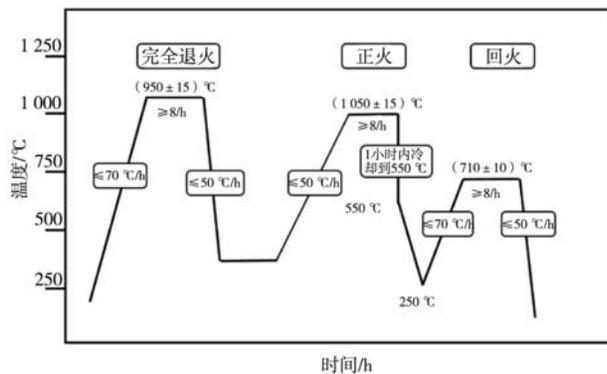


图6 涡轮壳体热处理工艺

Fig. 6 Heat treatment process of turbine shell

参考文献:

- [1] 第一重型机器厂, 哈尔滨工业大学. 大型铸钢件生产 [M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1979.

共析铁素体含量，另一方面控制共析转变速度，避免铸件开裂。

4 铸件生产验证

我公司使用以上工艺方案进行实际生产，清理后的铸件见图7所示。铸件尺寸检测结果、内部质量和表面质量均满足交货要求。

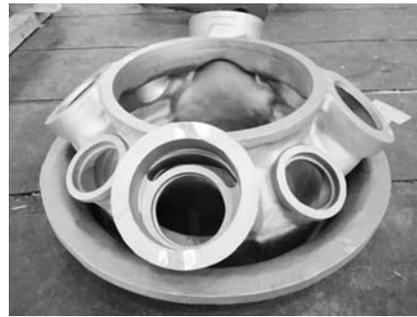


图7 交付前的涡轮壳体

Fig. 7 Turbine shell ready for delivery

5 结语

针对涡轮壳体的结构特点、成分和质量要求，分析了铸件可能的缺陷成因，从铸造工艺、浇注工艺、打箱工艺和热处理工艺方面提出了具体工艺参数，运用Magma对铸造工艺参数进行了优化。经实际生产验证，该工艺方案可行。

Manufacturing Process of Gas Turbine Shell

YANG Cheng-kun^{1,2}, WU Ren-gui², YE Wen-hui²

(1. Liaoning Fuan Heavy Industry Co., Ltd., Anshan 114016, Liaoning, China; 2. China Foundry Association, Beijing 100084, China)

Abstract:

Structure of turbine shell is complex, with large difference of wall thickness, and strict dimensional accuracy controlling. The surface defects, shrinkage porosity, cracks and other problems are also easy to come out. Based on the analysis of the structure, quality requirements and service conditions of the turbine shell, corresponding solutions from the aspects of casting process, pouring process, sand molding and heat treatment process were given. The adoption of the cores assembly structure, 1.5%-1.9% of shrinkage ratio and anti-deformation tie pieces ensured the dimensional accuracy of the airway. The measures of bottom gating system, reasonable rising speed of liquid steel and so on avoided inclusion or shrinkage porosity defects and ensured the internal quality of the casting. The casting surface quality and the feeding effect of the air-pass wall were assured by using of chromite molding sand. A dedicated plate was used to fix the casting and proper heating and cooling rates were controlled, which prevented the casting from deformation during heat treatment process.

Key words:

turbine shell; cast steel; casting process; deformation